Opérateur COMB_SISM_MODAL

1 But

Calculer une réponse dynamique à des mouvements imposés uniques ou multiples.

Dans le cas de l'excitation multiple, les appuis sont animés de mouvements différents pour une direction donnée. Ces mouvements peuvent être soit corrélés entre eux, soit parfaitement décorrélés. Ces sollicitations sont représentées par des spectres de réponse d'oscillateur représentant un séisme ou un choc. Ces spectres d'oscillateur peuvent être déterminés à partir d'un accélérogramme du signal sismique (signal réel ou signal synthétique) par la commande CALC_FONCTION avec le mot clé facteur SPEC_OSCI [U4.32.04].

L'opérateur COMB_SISM_MODAL permet de déterminer, en tout point de la structure, les composantes maximales de déplacement relatif, de pseudo-vitesse relative, de pseudo-accélération absolue, les efforts généralisés maximaux par élément et les réactions maximales aux appuis.

Ces maximums de réponse sont calculés à partir de la réponse maximale d'un oscillateur simple, associé à chaque mode propre réel pris en considération. Plusieurs règles de recombinaison des contributions de chaque mode propre et des contributions dans chaque direction sont disponibles.

Produit un concept de type mode_meca.

2 Syntaxe

```
R [mode_stat]  = COMB_SISM_MODAL

        (  ♦   MODE_MECA = mode                                  [mode_meca]
           ◊   /  TOUT_ORDRE = 'OUI'                             [DEFAUT]
               /  NUME_ORDRE = l_ordre                           [l_I]
               /  LIST_ORDRE = lordre                            [listis]
               /  NUME_MODE  = l_mode                            [l_I]
               /  /  FREQ =      l_freq                          [l_R]
                  /  LIST_FRE Q = lfreqr8                        [listr8]
                     ◊  I PRECISION =  /  1.D-3                  [DEFAUT]
                                       /  prec                   [R]
                        I CRITERE =    /  'RELATIF'              [DEFAUT]
                                       /  'ABSOLU'

           ◊   MODE_CORR = acce                                  [mode_stat_acce]
           ◊   FREQ_COUP = freq                                  [R]

           ♦   /  AMOR_REDUIT = amor                             [l_R]
               /  LIST_AMOR  = lamor                             [listr8]
               /  AMOR_GENE   = amogene                          [matr_asse_gene_R]

           ◊   MASS_INER      = mass_iner                        [tabl_mass_iner]

            ♦  /  MONO_APPUI  = 'OUI'
               /   MULTI_APPUI='CORRELE'
               /   MULTI_APPUI='DECORRELE'
           ♦   EXCIT =_F(♦  /  NOEUD     = lno                   [l_noeud]
                            /  GROUP_NO  = lgrno                 [l_gr_noeud]

                         ♦  /  ♦  AXE       = (c1, c2, c3)       [l_R]
                               ♦  SPEC_OSCI = spec               [nappe]
                               ◊  ECHELLE   = echel              [R]

                            /  ♦  TRI_AXE   = (p1, p2, p3)       [l_R]
                               ♦  SPEC_OSCI = spec               [nappe]
                               ◊  ECHELLE   = echel              [R]

                            /  ♦  TRI_SPEC  = 'OUI'              [Kn]
                               ♦  SPEC_OSCI=(spe1,spe2,spe3)     [l_fonction]
                               ◊  ECHELLE=(ech1, ech2, ech3)     [l_R]

                         ◊  NATURE =  /  'ACCE'                  [DEFAUT]
                                      /  'VITE'
                                      /  'DEPL'
                      )

           ◊   CORR_FREQ =  /  'OUI'
                            /  'NON'                             [DEFAUT]

           ♦   COMB_MODE =_F(  ♦  /  TYPE =    /  'GUPTA'
                                               /  'SRSS'
                                               /  'CQC'
                                               /  'DPC'
                                               /  'ABS'
                                               /  'DSC'
                                 ◊  DUREE = s                    [R]
                                 ◊  FREQ_1 = Hz                  [R]
                                 ◊  FREQ_2 = Hz                  [R]
                            )
```

```
        ◊  COMB_DIRECTION =_F(    ♦  /  TYPE = /  'QUAD'
                                              /  'NEWMARK'
                              )

     ◊  COMB_MULT_APPUI =_F(
                                  ♦  / TOUT = 'OUI'
                                      / NOEUD = lno       [l_noeud]
                                      / GROUP_NO =lgrno   [l_gr_noeud]
                                  ♦  / TYPE_COMBI =   / 'QUAD'
                                                      / 'LINE'

                                     )
     ◊GROUP_APPUI =_F(
                                  ♦   / NOEUD = lno       [l_noeud]
                                      / GROUP_NO =lgrno   [l_gr_noeud]

                                     )
     ◊  DEPL_MULT_APPUI =_F(
                                  ♦  NOM_CAS = nomcas
                                  ♦  NUME_CAS = numcas
                                  ◊  NOEUD_REFE = noeu    [noeud]
                                  ♦  MODE_STAT = stat     [mode_stat_depl]
                                  ♦  /  NOEUD = lno       [l_noeud]
                                     /  GROUP_NO = lgrno  [l_gr_noeud]
                                  ♦   I  DX =   dx        [R]
                                      I  DY =   dy        [R]
                                      I  DZ =   dz        [R]
                              )
     ◊  COMB_DEPL_APPUI =_F(
                                  ♦  /  TOUT = 'OUI'
                                     /  LIST_CAS = liste  [l_nume]
                                  ♦  /  TYPE_COMBI = / 'QUAD'
                                                     / 'LINE'
                                                      / 'ABS'
                                     )
         ♦ OPTION =      I  'DEPL'
                         I 'VITE'
                         I 'ACCE_ABSOLU'
                         I 'SIGM_ELNO'
                         I 'SIEF_ELGA'
                         | 'SIPO_ELNO'
                         | 'EFGE_ELNO'
                         I 'REAC_NODA'
                         I 'FORC_NODA'
        ◊  TITRE = tit                                    [l_Kn]
        ◊  INFO =    /  1                                 [DEFAUT]
                     /  2
        ◊  IMPRESSION =_F( /  TOUT   = 'OUI'              [DEFAUT]
                            / NIVEAU =    I 'SPEC_OSCI'
                                          I 'MASS_EFFE'
                                          I 'MAXI_GENE'
                         )
     )
```

3 Opérandes

3.1 Définition des modes propres de la structure

3.1.1 Opérande MODE_MECA

♦ MODE_MECA = mode

Nom du concept de type mode_meca produit par l'opérateur d'analyse modale CALC_MODES [U4.52.02].

3.1.2 Opérandes TOUT_ORDRE / NUME_ORDRE / NUME_MODE/LIST_ORDRE

/ TOUT_ORDRE = 'OUI'

Valeur par défaut qui permet d'extraire tous les modes propres disponibles dans le concept mode.

/ NUME_ORDRE = l_ordre
/ NUME_MODE = l_mode

Extraction des modes propres définis par une liste l_ordre de numéros d'ordres (NUME_ORDRE) ou une liste l_mode de numéros de modes (NUME_MODE).

/ LIST_ORDRE = l_ordre

Idem NUME_ORDRE mais de type listis (produit par DEFI_LIST_ENTI)..

3.1.3 Opérande FREQ / LIST_FREQ / PRECISION / CRITERE

/ FREQ = l_freq

Permet d'extraire les modes propres correspondant à une liste de fréquences l_freq.

/ LIST_FREQ = lfreqr8

Permet d'extraire les modes propres correspondant à une liste de fréquences lfreqr8, définie par l'opérateur DEFI_LIST_REEL [U4.34.01] (lfreqr8 est donc un concept de type listr8).

◊ | PRECISION = prec
| CRITERE =

Ces opérandes permettent d'indiquer que l'on recherche tous les modes propres dont la fréquence se trouve dans l'intervalle $inst \pm prec$. Par défaut $prec = 1.0\mathrm{D}-3$.

Suivant la valeur du mot-clé CRITERE :

'RELATIF' : l'intervalle de recherche est :

$$[inst(1-prec), inst(1+prec)]$$

'ABSOLU' : l'intervalle de recherche est :

$$[inst-prec, inst+prec]$$

3.2 Définition des amortissements modaux

Trois possibilités existent pour définir les amortissements modaux : une liste d'amortissements réduits fournie par l'utilisateur sous forme de liste de réels (l_R) ou d'un concept de type listr8 construit par l'opérateur DEFI_LIST_REEL [U4.34.01] ou une matrice d'amortissement généralisée (matrice d'amortissement projetée sur la base des modes propres réels).

3.2.1 Opérande AMOR_REDUIT

/ AMOR_REDUIT = amor

Cet opérande permet de fournir la liste des amortissements réduits sous forme d'une liste de réels (l_R). Si le nombre de coefficients fournis est inférieur aux nombres de modes propres pris en compte, le dernier coefficient est attribué au mode correspondant et aux modes suivants.

3.2.2 Opérande LIST_AMOR

/ LIST_AMOR = lamor

Cet opérande permet de fournir la liste des amortissements réduits sous forme d'un concept de type listr8. Si le nombre d'amortissements réduits est inférieur au nombre de modes propres pris en compte, le dernier coefficient est affecté aux modes suivants.

Exemple :

```
TOUT_ORDRE = 'OUI'
LIST_AMOR =('0.01', '0.02')
```

premier mode $\xi=0.01$ et pour tous les autres modes $\xi=0.02$

3.2.3 Opérande AMOR_GENE

/ AMOR_GENE = amogene

On donne le nom de la matrice d'amortissement généralisé amogene produite par l'opérateur PROJ_MATR_BASE [U4.63.12] ou PROJ_BASE [U4.63.11].

Remarque :

*Pour des raisons théoriques (cadre de COMB_SISM_MODAL restreint à l'amortissement « classique ») la matrice d'amortissement doit être **diagonale**.*

3.3 Opérande MASS_INER

Pour vérifier le critère de cumul des masses effectives unitaires des modes propres pris en compte dans chaque direction, il est nécessaire de connaître la masse totale de la structure.

Celle-ci est calculée par la commande POST_ELEM [U4.81.22] avec le mot clé MASS_INER. L'opérande MASS_INER permet de fournir le nom du concept produit par cette commande.

3.4 Définition du type de l'excitation (mono ou multi-appuyée)

Trois configurations sont possibles :

- la structure est étudiée avec le même mouvement d'entraînement à tous les appuis;
- la structure est étudiée avec plusieurs mouvements d'entraînement différents aux appuis, tous corrélés entre eux ;
- la structure est étudiée avec plusieurs mouvements d'entraînement différents aux appuis, dont on peut exhiber des groupes parfaitement décorrélés entre eux, les excitations à l'intérieur d'un même groupe d'appuis étant supposées corrélées entre elles.

3.4.1 Opérande MONO_APPUI

/ MONO_APPUI = 'OUI'

Les excitations aux appuis sont toutes égales.

3.4.2 Opérande MULTI_APPUI

/ MULTI_APPUI='CORRELE'

Les excitations aux appuis sont toutes corrélées entre elles (elles peuvent être différentes ou égales).

```
/ MULTI_APPUI='DECORRELE'
```

Les excitations aux appuis peuvent être regroupées de telle sorte qu'on puisse exhiber des groupes (constitués éventuellement d'un seul appui) parfaitement décorrélés entre eux ; à l'intérieur d'un même groupe, les appuis sont supposés corrélés entre eux.

3.5 Description de l'excitation : mot clé EXCIT

L'excitation sismique est définie par un ou plusieurs spectres d'oscillateurs. Ceux-ci sont calculés au préalable par la commande CALC_FONCTION [U4.32.04] ou lus sur un fichier par la commande LIRE_FONCTION [U4.32.02]. Dans les deux cas, le concept produit est de type fonction à deux variables (nappe).

On utilise pour cela le mot-clé facteur

♦ EXCIT

et éventuellement l'opérande CORR_FREQ.

3.5.1 Opérandes NOEUD / GROUP_NO

On précise à chaque occurrence du mot-clé facteur les nœuds ou groupes de nœuds concernés par l'excitation décrite :

```
/ NOEUD    = lno
/ GROUP_NO = lgrno
```

3.5.2 Excitation suivant un axe

```
/ ♦ AXE       = (c1, c2, c3)
  ♦ SPEC_OSCI = spec
  ◊ ECHELLE   = echel
```

Dans ce cas, on fournit :

- les cosinus directeurs $(c1\, c2\, c3)$ de l'axe d'excitation dans le repère GLOBAL de définition du maillage : les coefficients $c1, c2, c3$ sont renormés par la commande,
- l'opérande SPEC_OSCI attend un seul spectre d'oscillateur où spec est le nom de la nappe à utiliser,
- l'opérande ECHELLE permet de définir un facteur d'échelle echel à appliquer à tous les points du spectre spec.

Exemple :

Pour une excitation à 45° par rapport au repère GLOBAL, un spectre de sol sol_0_1 calé à $0.1\, g$ et un facteur d'échelle permettant de simuler un spectre calé à $0.25\, g$:

```
AXE =( 1., 1., 0.),
SPEC_OSCI=sol_0_1,
ECHELLE=2.5,
```

3.5.3 Excitation triaxiale avec un seul spectre

```
/ ♦ TRI_AXE   = ( p1, p2, p3 )
  ♦ SPEC_OSCI = spec
  ◊ ECHELLE   = echel
```

Dans ce cas, on fournit :

- les coefficients de pondération $(p1\ p2\ p3)$ à appliquer au spectre d'oscillateur pour chacune des directions X, Y et Z,
- l'opérande `SPEC_OSCI` attend un seul spectre d'oscillateur où `spec` est le nom de la nappe à utiliser,
- l'opérande `ECHELLE` permet de définir un facteur d'échelle `echel` à appliquer à tous les points du spectre `spec`, indépendamment des coefficients de pondération de direction.

Exemple :

Pour une excitation avec une pondération de $1.$ en X et en Y (plan horizontal) et 0.66 en Z (vertical), un spectre de sol calé à $0.1\,g$ et un facteur d'échelle permettant de simuler un spectre calé à $0{,}25\,g$:

```
TRI_AXE=( 1., 1., 0.66),
SPEC_OSCI=sol_0_1,
ECHELLE=2.5,
```

3.5.4 Excitation triaxiale avec trois spectres différents

```
/  ♦  TRI_SPEC  = 'OUI'
   ♦  SPEC_OSCI = ( spe1, spe2, spe3 )
    ◊  ECHELLE   = ( ech1, ech2, ech3 )
```

Dans ce cas on fournit :

- l'opérande `TRI_SPEC`: `'OUI'`,
- l'opérande `SPEC_OSCI` attend trois spectres d'oscillateurs où `(spe1 spe2 spe3)` est la liste des nappes à utiliser dans les trois directions X, Y, Z.
- l'opérande `ECHELLE` permet de définir trois facteurs d'échelle `(ech1 ech2 ech3)` à appliquer indépendamment à tous les points de chacun des spectres .

3.5.5 Opérande NATURE

◊ `NATURE`

Cet opérande permet de préciser la grandeur du spectre d'oscillateur. Par défaut, on utilise un spectre d'accélération '`ACCE`'. Il est possible d'utiliser plus rarement d'autres grandeurs : vitesse '`VITE`' ou déplacement '`DEPL`'.

3.5.6 Opérande CORR_FREQ

◊ `CORR_FREQ`

Pour calculer les composantes de réponse en vitesse ou en accélération à partir d'un spectre d'oscillateur de la grandeur déplacement (`NATURE = 'DEPL'`), on est conduit à multiplier chaque valeur une ou deux fois par ω_r pulsation du mode propre réel (oscillateur non amorti). En toute rigueur l'oscillateur r est amorti et sa pulsation propre est $\omega_r\sqrt{1-\xi^2}$ et ω_r n'est que la pseudo-pulsation propre. Par défaut, on obtient donc :

$$\begin{aligned} vite_{max} &= \omega_r depl_{lu} = pseudo-vitesse \\ acce_{max} &= \omega_r^2 depl_{lu} = pseudo-accélération \end{aligned}$$

L'opérande `CORR_FREQ : 'OUI'` permet de corriger ces valeurs pour prendre en compte l'amortissement du mode propre :

$$\begin{aligned} vite_{max} &= \omega_r\sqrt{1-\xi^2}\, depl_{lu} = vitesse \\ acce_{max} &= \omega_r^2\left(1-\xi^2\right) depl_{lu} = accélération \end{aligned}$$

Si on fournit un spectre de réponse en vitesse (`NATURE = 'VITE'`) l'opérande `CORR_FREQ` sera nécessaire pour corriger $depl_{max}$ et $acce_{max}$ si nécessaire. De même pour un spectre de réponse en accélération (`NATURE = 'ACCE'`) pour corriger $depl_{max}$ et $vite_{max}$.

Dans tous les cas, on veillera à ne pas utiliser comme donnée SPEC un spectre de pseudo-grandeur.

3.6 Règles de combinaison

Pour évaluer un majorant de la réponse de la structure, on raisonne grandeur par grandeur (déplacement, vitesse ou accélération, efforts internes, contraintes) à partir des valeurs modales associées aux modes propres pris en considération. Pour chaque grandeur, on traitera **indépendamment** chaque degré de liberté (champs aux nœuds de déplacement, vitesse ou accélération), ou chaque composante de torseur (efforts internes) ou de contrainte. C'est ce que nous appelons la réponse R dans l'énoncé des règles de combinaison.

Plusieurs niveaux de combinaisons sont nécessaires :

- combinaison des modes propres,
- correction statique par pseudo-mode,
- combinaison suivant les directions de séisme.

Dans le cas d'une analyse multi-appui, les règles de combinaison sont modifiées pour tenir compte des différentes excitations appliquées à des groupes d'appuis. Il est également possible de calculer séparément les composantes primaires et secondaires de la réponse.

3.7 Règles de combinaison pour une excitation mono-appui

La réponse **totale** de la structure R est obtenue par **combinaison des réponses directionnelles** R_X où X représente une des directions du repère `GLOBAL` de définition du maillage (X, Y, Z) ou une direction particulière (cf. opérande `AXE`). La réponse directionnelle est donnée par :

$$R_X=\sqrt{R_d^2+(R_t+R_{qs})^2+R_e^2}$$

- R_d réponse combinée dynamique des oscillateurs modaux établie par le mot clé `COMB_MODE` [§ 3.7.1]
- R_t correction des effets statiques des modes négligés (pseudo-mode) [§ 3.7.2]
- R_{qs} réponse combinée quasi-statique des oscillateurs modaux établie par le mot clé `COMB_MODE (TYPE ='GUPTA')` [§ 3.7.1.6]
- R_e contribution du mouvement d'entraînement ($R_e=0$ en mono-appui)

La règle de combinaison des réponses directionnelles est définie par le mot clé `COMB_DIRECTION` [§ 3.6.3].

3.7.1 Combinaison des modes propres : mot clé `COMB_MODE`

♦ `COMB_MODE`

La réponse de la structure R_d, **dans une direction de séisme**, est obtenue par une des combinaisons possibles (définie par l'opérande `TYPE`) des contributions de chacun des modes propres pris en compte. Chaque mode propre est considéré comme un oscillateur indépendant de réponse R_r défini par (ω_r, ξ_r). La réponse est lue par interpolation dans le spectre d'oscillateur du signal d'excitation dans cette direction.

Pour une excitation mono-appui, la réponse R_r de l'oscillateur r est donnée par :

$$R_r = \frac{p_r}{\omega_r^2} S_r \Phi_r$$

- Φ_r grandeur modale (déplacement, effort généralisé, réaction) associée au mode propre d'indice r
- P_r facteur de participation modale associé au mode r dans la direction étudiée
- S_r valeur du spectre de réponse, par exemple en pseudo-accélération, pour l'oscillateur r

Plusieurs règles de combinaison des modes propres sont disponibles. Elles sont choisies par l'opérande `TYPE`.

3.7.1.1 Combinaison quadratique `TYPE = 'SRSS'`

Cette combinaison (Square Root of Sum of Squares) correspond à l'hypothèse d'indépendance stricte des oscillateurs associés à chaque mode propre :

$$R_d = \sqrt{\sum_{r=1}^{nmod} R_r^2}$$

Notons que cette règle de combinaison, bien que très couramment utilisée, peut être mal adaptée quand l'hypothèse d'indépendance n'est pas vérifiée pour des modes propres voisins ou avec amortissement important.

3.7.1.2 Combinaison quadratique complète `TYPE = 'CQC'`

La combinaison quadratique (établie par DER KIUREGHIAN [bib1]) apporte une correction à la règle précédente en introduisant des coefficients de corrélation dépendant des amortissements et des distances entre modes propres voisins (cf. [R4.05.03]) :

$$R_d = \sqrt{\sum_{r_1} \sum_{r_2} \rho_{r_1 r_2} R_{r_1} R_{r_2}}$$

avec le coefficient de corrélation :

$$\rho_{ij} = \frac{8\sqrt{\xi_i \xi_j \omega_i \omega_j}\left(\xi_i \omega_i + \xi_j \omega_j\right)\omega_i \omega_j}{\left(\omega_i^2 - \omega_j^2\right)^2 + 4\xi_i \xi_j \omega_i \omega_j \left(\omega_i^2 + \omega_j^2\right) + 4\left(\xi_i^2 + \xi_j^2\right)\omega_i^2 \omega_j^2}$$

3.7.1.3 Somme des valeurs absolues `TYPE = 'ABS'`

Cette combinaison correspond à une hypothèse de dépendance complète des oscillateurs associés à chaque mode propre :

$$R_d = \sum_{r=1}^{nmod} \left|R_r\right|$$

Notons que cette règle de combinaison est à déconseiller, car elle est trop fortement conservatrice et conduit à un sur-dimensionnement systématique.

3.7.1.4 Combinaison avec règle des 10% `TYPE = 'DPC'`

Les modes voisins (dont les fréquences différent de moins de 10%) sont d'abord combinés par sommation des valeurs absolues. Les valeurs résultant de cette première combinaison sont ensuite combinées quadratiquement. Cette méthode a été proposée par le règlement américain U.S. Nuclear Regulatory Commission (Regulatory Guide 1.92 - Février 1976) pour atténuer le conservatisme de la méthode précédente. Elle reste en défaut pour des structures avec un spectre de fréquences propres dense.

3.7.1.5 Combinaison de ROSENBLUETH `TYPE = 'DSC'`

Cette règle (proposée par E. ROSENBLUETH et J. ELORDY [bib2]) introduit une corrélation entre modes, différente de celle de la méthode CQC. Les réponses des oscillateurs sont combinées par double somme (Double Sum Combination) :

$$R_d=\sqrt{\sum_{r_1}\sum_{r_2}\rho_{r_1 r_2}R_{r_1}R_{r_2}}$$

Elle nécessite une donnée supplémentaire, la durée s de la phase “forte” du séisme définie par l'opérande `DUREE`.

Le coefficient de corrélation est alors :

$$\rho_{ij}=\left(1+\left(\frac{\omega'_i-\omega'_j}{\xi'_i\omega_i+\xi'_j\omega_j}\right)^2\right)^{-1}$$

$$où\quad \omega'_i=\omega_i\sqrt{1-\xi_i^2}\quad et\quad \xi'_i=\xi_i+\frac{2}{s\,\omega_i}$$

3.7.1.6 Combinaison selon Gupta `TYPE = 'GUPTA'`

Gupta [NRC1.92], pour prendre en compte les corrélations entre modes dues à la partie quasi-statique de la réponse, introduit le facteur de réponse rigide, qui fait varier de 0 à 1 la corrélation entre les réponses modales de fréquences intermédiaires entre $FREQ_1$ et $FREQ_2$, deux fréquences à déterminer par l'utilisateur.

Gupta décompose chaque réponse modale R_r en une partie dynamique R_r^p et une partie quasi-statique R_r^{qs} : $R_r^{qs}=\alpha_r R_r$ et $R_r^p=\sqrt{1-\alpha_r^2}\,R_r$

Ainsi, pour chaque mode r, on affecte le facteur de réponse rigide α_r à la réponse modale R_r :

$\alpha_r=0$ pour $f\leq f_1$ et $\alpha_r=1$ pour $f\geq f_2$

α_r est estimé pour la fréquence f_r selon la formule suivante :

$$\alpha_r=\frac{\ln f_r/f_1}{\ln f_2/f_1}$$

La réponse combinée dynamique des oscillateurs modaux est effectuée selon la combinaison '`CQC`' :

$$R_d=\sqrt{\sum_{r_1}\sum_{r_2}\rho_{r_1 r_2}R_{r_1}^p R_{r_2}^p}$$

La réponse combinée quasi-statique des oscillateurs modaux est effectuée selon une combinaison algébrique :

$$R_{qs}=\sum_{r=1}^{nmod}R_r^{qs}$$

Cette combinaison selon GUPTA n'est disponible que dans le cas mono-appui.

3.7.2 Correction statique par pseudo-mode : opérande MODE_CORR

La base modale utilisée est en général incomplète. L'évaluation du majorant de la réponse à une excitation sismique nécessite, de ce fait, une correction par un terme représentant la contribution statique des modes propres négligés, dans chaque direction de séisme.

Pour chaque direction du séisme, on réalise cette correction, en ajoutant à la base modale, un pseudo-mode ψ obtenu à partir d'un mode statique φ, champ de déplacements des nœuds de la structure soumise à une accélération uniforme **dans la direction considérée** défini par :

$$\boldsymbol{K}\,\varphi=\boldsymbol{M}\,\delta$$

- $\boldsymbol{K}$ matrice de rigidité de la structure
- $\boldsymbol{M}$ matrice de masse de la structure
- δ champ unitaire dans la direction du séisme

Le pseudo-mode ψ est obtenu en soustrayant les contributions statiques des modes pris en compte :

$\Psi=\varphi-\sum_{r=1}^{nmod}\frac{p_r}{\omega_r^2}\Phi_r$ avec :

- Φ_r mode propre d'indice r
- P_r facteur de participation dans la direction δ

Dans cette direction δ, pour chaque grandeur, la contribution des modes négligés est donnée par :

$$R_t=R_s-\sum_{r=1}^{nmod}R_r$$

R_s est la grandeur associée au mode statique

◊ MODE_CORR = acce

Ce mot clé permet de fournir le(s) champ(s) de déplacements φ des nœuds de la structure soumise à une accélération uniforme dans une (ou plusieurs) direction(s), champ(s) calculé(s) par l'opérateur MODE_STATIQUE avec le mot clé PSEUDO_MODE [U4.52.14]. Pour toute direction de séisme où la réponse est calculée, on calcule un pseudo-mode si acce est fourni.

◊ FREQ_COUP = fcoup

Ce mot clé permet de fournir la fréquence où on va lire sur le SRO la valeur qui va être utilisée pour le niveau de correction statique. Cette fréquence correspond normalement à la fréquence de coupure du signal sismique, i.e. celle où le SRO atteint (en accélération) une asymptote.
Ce mot clef est particulièrement utile lorsque la dernière fréquence de la base modale n'atteint pas la fréquence de coupure du signal sismique bien qu'elle soit néanmoins suffisante pour prendre en compte tous les modes prépondérants pour la réponse de la structure.

3.7.3 Combinaison suivant les directions : mot clé COMB_DIRECTION

◊ COMB_DIRECTION

Deux règles de combinaison des réponses directionnelles sont disponibles. Elles sont choisies par l'opérande TYPE.

3.7.3.1 Combinaison quadratique : TYPE = 'QUAD'

Cette combinaison correspond à l'hypothèse d'indépendance stricte des réponses dans chaque direction :

$$R=\sqrt{R_X^2+R_Y^2+R_Z^2}$$

3.7.3.2 Combinaison de NEWMARK : TYPE = 'NEWMARK'

Pour chacune des directions $i(X,Y,Z)$, on calcule les 8 valeurs :

$$R_i=\pm R_X\pm 0{,}4\,R_Y\pm 0{,}4\,R_Z$$

Ce qui conduit, par permutation circulaire, à 24 valeurs et

$$R=max(Ri)$$

3.8 Cas d'une excitation multi-appui

Deux traitements sont prévus [bib 3] :

- Calcul de la réponse globale
- Calcul des composantes primaires et secondaires de la réponse

Dans le cas de l'excitation multiple, ces appuis sont animés de mouvements différents pour une direction donnée. On distingue alors 2 cas distincts :

- soit ces mouvements sont tous corrélés entre eux (cas excitations corrélées),
- soit on peut exhiber au moins 2 groupes d'appuis parfaitement décorrélés, les appuis constitutifs d'un même groupe étant corrélés entre eux (cas excitations décorrélées).

3.8.1 Calcul de la réponse globale

Par rapport au mono-appui, une combinaison supplémentaire est nécessaire. Le schéma de traitement diffère selon que les excitations sont corrélées ou décorrélées.

3.8.1.1 Excitations corrélées

•Pour chaque mode d'indice j, on calcule les réponses directionnelles modales R_{Xj} par combinaison des réponses directionnelles modales d'appui R_{Xij}. La règle de combinaison est définie par le mot-clé COMB_MULT_APPUI [§ 3.8.3].

•On calcule les réponses directionnelles R_X définies par :

$$R_X=\sqrt{R_{Xd}^2+R_{Xt}^2+R_{Xe}^2}$$

- R_{Xd} est la réponse combinée des réponses directionnelles modales établie par le mot-clé COMB_MODE [§ 3.7.1] ;
- R_{Xt} représente la correction statique des modes négligés. Ce terme est obtenu par cumul algébrique des pseudo-modes d'appui ;
- R_{Xe} représente le mouvement d'entraînement. Ce terme est obtenu par combinaison algébrique des mouvements d'entraînement d'appui.

•La réponse totale R de la structure est obtenue par combinaison des réponses directionnelles R_X. La règle de combinaison est définie par le mot clé COMB_DIRECTION [§ 3.7.3].

3.8.1.2 Excitations décorrélées

- On définit les groupes éventuels d'appuis à l'aide du mot-clé GROUP_APPUI. Les réponses des oscillateurs modaux d'un même groupe d'appuis sont combinées linéairement (pas de choix laissé à l'utilisateur pour ce cumul intra-groupe).

- Pour chaque appui ou groupe d'appuis indicé par i, soumis à une excitation différente, on calcule les réponses directionnelles d'appuis R_{Xi} définies par :

$$R_{Xi}=\sqrt{R_{Xdi}^2+R_{Xti}^2+R_{Xei}^2}$$

  - R_{Xdi} est la réponse combinée des oscillateurs modaux établie par le mot clé `COMB_MODE` [§ 3.7.1] .
  - R_{Xti} représente la correction des effets statiques des modes négligés. Le terme diffère du cas mono-appui. Le calcul est similaire mais fait intervenir le champ de déplacements de la structure soumise à une accélération unitaire de l'appui i dans la direction X [bib3] ;
  - R_{Xei} est la contribution du mouvement d'entraînement de l'appui i ($R_{ei}\neq 0$ en multi-appui) établie par le mot-clé `DEPL_MULT_APPUI` [§ 3.8.5].
- On calcule les réponses directionnelles R_X par combinaison des réponses directionnelles d'appuis R_{Xi}. Les groupes d'appuis étant supposés décorrélés entre eux, les réponses directionnelles d'appuis sont combinées quadratiquement (pas de choix laissé à l'utilisateur).

  - La réponse totale R de la structure est obtenue par combinaison des réponses directionnelles R_X. La règle de combinaison est définie par le mot clé `COMB_DIRECTION` [§ 3.7.3].

3.8.2 Partition des composantes primaire et secondaire de la réponse

Pour l'analyse sismique des tuyauteries multi-supportées, la partition des composantes inertielle et quasi-statique de la réponse peut s'avérer nécessaire en vue d'un post-traitement RCC-M [bib3].

3.8.2.1 Composante primaire inertielle

Il s'agit de la réponse inertielle induite par les accélérations imposées aux ancrages (SRO). On reconduit le traitement adopté pour la réponse globale en supprimant la contribution du mouvement d'entraînement.
L'ordre des combinaisons à effectuer diffère selon que les excitations des appuis sont toutes corrélées entre elles ou qu'elles constituent des groupes décorrélés entre eux.

- <u>Appuis corrélés</u>

  - Pour chaque oscillateur modal j, on calcule les réponses directionnelles modales (cumul sur les appuis) $R_{IXj}=\sqrt{R_{dj}^2+R_{tj}^2}$ avec :
    - R_{dj} réponse modale combinée des oscillateurs modaux (cumul sur les appuis). La règle de combinaison est définie par le mot-clé `COMB_MULT_APPUI` [§ 3.8.3].
    - R_{tj} contribution de la correction statique des modes négligés (pseudo-mode d'appui)
  - On calcule les réponses directionnelles R_{IX} par combinaison des réponses directionnelles modales R_{IXj}, à l'aide du mot-clé `COMB_MODE` [§ 3.7.1].

- <u>Groupes décorrélés d'appuis</u>

  - On définit les groupes éventuels d'appuis à l'aide du mot-clé `GROUP_APPUI`. Les réponses des oscillateurs modaux d'un même groupe d'appuis sont combinées linéairement (pas de choix laissé à l'utilisateur pour ce cumul intra-groupe).
  - Pour chaque appui ou groupe d'appuis indicé par i, soumis à une excitation différente, on calcule les réponses directionnelles d'appuis primaires $R_{I\,X\,i}$ définies par :

$$R_{I\,Xi}=\sqrt{R_{di}^2+R_{ti}^2}$$

- R_{di} réponse combinée des oscillateurs modaux établie par le mot-clé `COMB_MODE` [§ 3.7.1]
- R_{ti} représente la correction des effets statiques des modes négligés. Le terme diffère du cas mono-appui. Le calcul est similaire mais fait intervenir le champ de déplacements de la structure soumise à une accélération unitaire de l'appui i dans la direction X [bib3].

- On calcule les réponses directionnelles R_{IX} par combinaison des réponses directionnelles d'appuis R_{IXi}. Les groupes d'appuis étant supposés décorrélés entre eux, les réponses directionnelles d'appuis sont combinées quadratiquement (pas de choix laissé à l'utilisateur).

La réponse totale primaire R_I de la structure est obtenue par combinaison des réponses directionnelles R_{IX}. La règle de combinaison est définie par le mot clé `COMB_DIRECTION` [§ 3.7.3].

3.8.2.2 Composante secondaire différentielle

Il s'agit de la réponse statique induite par les déplacements différentiels sismiques des ancrages (mouvement d'entraînement) :

- Calcul de la contribution R_{ei} du mouvement d'entraînement de l'appui i établie par le mot-clé `DEPL_MULT_APPUI` [§ 3.8.5]

- Combinaisons des différentes contributions d'appui définies R_{ei} par le mot-clé `COMB_DEPL_APPUI` [§ 3.8.6].

Il est ainsi possible de reconstituer :

- les cas de charge réglementaire correspondant à :
  - un mouvement d'ensemble d'une partie des appuis dans une direction donnée
  - un déplacement mentionné dans un repère local différent du repère global de sollicitation sismique inertielle ;
- les réponses directionnelles en combinant les contributions d'appuis adéquates ;
- la réponse secondaire totale.

Des exemples sont proposés dans le [§ 3.8.6.6].

3.8.3 Mot clé `COMB_MULT_APPUI` (cas `MULTI_APPUI=CORRELE`)

◊ `COMB_MULT_APPUI`

Les occurrences de ce mot clef permettent de définir :
- les combinaisons des réponses directionnelles modales d'appui pour former les réponses directionnelles modales (cas des excitations corrélées) ;
- les combinaisons des réponses directionnelles d'appui pour former les réponses directionnelles de la structure (cas des excitations décorrélées).
Si les occurrences du mot clef `COMB_MULT_APPUI` sont présentes, c'est la composante primaire de la réponse qui est traitée.

La combinaison des contributions de chaque mouvement d'appui peut être combinée de différentes manières, définies par l'opérande `TYPE_COMBI` :

- combinaison quadratique
- combinaison linéaire

3.8.3.1 Opérandes `TOUT / NOEUD / GROUP_NO`

♦ / `TOUT = 'OUI'`

Permet de choisir que tous les appuis sont combinés avec la règle définie par `TYPE`

```
/ NOEUD = lno            [l_noeud]
/ GROUP_NO  = lgrno      [l_group_no]
```

Permet de définir la liste des appuis (ou groupes d'appuis) qui sont combinés avec la règle définie par l'opérande `TYPE_COMBI` dans la même occurrence du mot clé `COMB_MULT_APPUI`.

3.8.3.2 Combinaison quadratique TYPE = 'QUAD'

$$R_X = \sqrt{\sum R_{Xj}^2}$$

Il est conseillé de n'utiliser cette combinaison que lorsque les mouvements d'appui sont décorrélés.

3.8.3.3 Combinaison linéaire TYPE = 'LINE'

$$R_X = \sum R_{Xk}$$

3.8.3.4 Règles de combinaison différentes sur les différents appuis

La règle de combinaison peut être la même pour tous les appuis [§ 3.7.3.1] ou différentiée suivant les appuis ou groupes d'appuis définis par une occurrence du mot clé facteur `COMB_MULT_APPUI`. Dans ce cas la réponse totale - ou la composante primaire de la réponse si `COMB_DEPL_APPUI` est présent - est obtenue par :

$$R = \sqrt{\sum R_{Xj}^2 + \left(\sum R_{Xk}\right)^2}$$

où j désigne les appuis combinés quadratiquement et k appuis combinés linéairement.

3.8.4 Mot clé GROUP_APPUI (cas MULTI_APPUI=DECORRELE)

◊ `GROUP_APPUI`

Si ce mot-clé est absent, tous les appuis sont considérés comme décorrélés entre eux.
Ce mot-clé n'est utilisé que dans le cas où on peut exhiber un ou plusieurs groupes d'appuis décorrélés entre eux, les appuis constitutifs d'un groupe étant corrélés entre eux. Un groupe peut être constitué d'un seul appui.
Les occurrences de ce mot-clé permettent de définir les groupes d'appuis. Les appuis n'appartenant pas à un groupe sont considérés comme décorrélés entre eux et décorrélés des groupes définis.

La combinaison des contributions de chaque mouvement d'appui à l'intérieur d'un groupe ne peut être réalisée que de manière linéaire. La combinaison des contributions de chaque groupe d'appuis ne peut être réalisée que de manière quadratique (pas de choix laissé à l'utilisateur).

3.8.4.1 Opérandes TOUT / NOEUD / GROUP_NO

```
♦  / NOEUD = lno            [l_noeud]
   / GROUP_NO  = lgrno      [l_group_no]
```

Permet de définir la liste des groupes d'appuis.

3.8.5 Mot clé DEPL_MULT_APPUI

◊ `DEPL_MULT_APPUI`

Le mouvement d'entraînement de la structure n'étant pas uniforme ce mot clé permet de définir la contribution à la réponse globale d'une liste d'appuis ou de groupes d'appuis. Celle-ci est établie à partir des modes statiques de la structure :

$$R_{ei} = \Phi_{si}\,\delta_{i\,max}$$

avec :

Φ_{si} mode statique pour l'appui i

$\delta_{i\,max}$ déplacement maximal de l'appui i par rapport à un appui de référence (pour lequel $\delta_{i\,max}=0$)

Si ce mot-clé n'est pas renseigné, alors la contribution des modes statiques de la structure est nulle. Autrement dit, ceci est équivalent à renseigner $\delta_{i\,max}=0$.

3.8.5.1 Opérande `NOM_CAS/NUME_CAS`

♦ `NOM_CAS = nomcas`
Chaîne de caractère définissant le nom du cas de charge

• `NUME_CAS = numecas`
Numéro du cas de charge

3.8.5.2 Opérande `MODE_STAT`

◊ `MODE_STAT = stat`

Nom des modes statiques Φ_{si} , concept de type `mode_stat` produit par l'opérateur `MODE_STATIQUE` [U4.52.14].

3.8.5.3 Opérande `NOEUD_REFE`

◊ `NOEUD_REFE = noeu`

Nœud de référence par rapport auquel sont définis les déplacements relatifs des appuis.
Si cette opérande est présente, le déplacement maximal appliqué à l'appui i vaut $\delta_{i\,max}-\Delta$ où Δ est le déplacement affecté au noeud de référence `noeu` dans la direction considérée.

3.8.5.4 Opérandes `NOEUD` / `GROUP_NO`

♦ / `NOEUD = lno`
/ `GROUP_NO = lgrno`

Liste des noms de nœuds (ou groupes de nœuds) correspondant aux appuis concernés par l'occurrence du mot clé facteur `DEPL_MULT_APPUI`.

3.8.5.5 Opérandes `DX` / `DY` / `DZ`

♦ | `DX = dx`
| `DY = dy`
| `DZ = dz`

Valeur de déplacement relatif maximal des appuis concernés, direction par direction.

3.8.6 Mot clé `COMB_DEPL_APPUI`

◊ `COMB_DEPL_APPUI`

Les occurrences de ce mot clef définissent les combinaisons des cas de charge réglementaires intervenant dans la composante secondaire de la réponse.

3.8.6.1 Opérandes `TOUT / LISTE_CAS`

♦ / `TOUT = 'OUI'`
Tous les cas de charges définis sous les occurrences de `DEPL_MULT_APPUI` sont combinés avec une règle unique précisée par `TYPE`

/ `LISTE_CAS = liste`

Numéros des cas de charges combinés avec la règle précisée par `TYPE`

3.8.6.2 Combinaison quadratique TYPE = 'QUAD'

$$R_e=\sqrt{\sum R_{ej}^2}$$

3.8.6.3 Combinaison linéaire TYPE = 'LINE'

$$R_e=\sum R_{ek}$$

3.8.6.4 Combinaison en valeur absolue TYPE = 'ABS'

$$R_e=\sum |R_{el}|$$

3.8.6.5 Règles de combinaison différentes sur les différents cas de charge

La règle de combinaison peut être la même pour tous les cas de déplacement d'ancrage ou différentiée suivant les groupes de cas définis par une occurrence du mot clé facteur COMB_DEPL_APPUI. Dans ce cas la réponse totale secondaire est obtenue par :

$$R_{II}=\sqrt{\sum R_{ej}^2+\left(\sum R_{ek}\right)^2+\left(\sum |R_{el}|\right)^2}$$

où j désigne les appuis combinés quadratiquement, k appuis combinés linéairement et l appuis combinés en valeur absolue.

3.8.6.6 Exemples d'application

•Déplacement exprimé dans un repère local $R_{loc}(x,y,z)$ différent du repère global $R_{glob}(X,Y,Z)$

Les axes x, y et z de R_{loc} sont construits par 3 rotations successives d'angle α, β et γ autour des axes X, Y et Z de R_{glob}.

Pour simplifier l'exemple, on considère que R_{loc} se déduit de R_{glob} par une rotation unique autour de l'axe X et d'angle α et que le déplacement local u_x du support S localisé au nœud NS est donné suivant l'axe x de R_{loc}.

Ce cas de charge résulte de la combinaison linéaire de 2 modes statiques et se traduit par la sommation algébrique des 2 chargements suivants :

•déplacement $DX=u_x \cos\alpha\, depl\, X$ suivant l'axe X
•déplacement $DY=u_x \sin\alpha\, depl\, Y$ suivant l'axe Y

Les modes statiques d'appui suivant les directions X et Y sont préalablement calculés.
La prise en compte du cas de charge s'écrit avec la syntaxe suivante :

```
DEPL_MULT_APPUI=(
            _F(
               NOM_CAS='uxcos',
               NUME_CAS=1,
               MODE_STAT=modstat,
               NOEUD='NS',
               DX=deplX,
               ),
            _F(
               NOM_CAS='uxsin',
               NUME_CAS=2,
               MODE_STAT=modstat,
               NOEUD='NS',
               DY=deplY,
               ),
                  ),
COMB_DEPL_APPUI=(
            _F(
               LIST_CAS=('1','2'),
               TYPE_COMBI = 'LINE'
               ),
```

•Mouvement d'ensemble dans une direction

Considérons une ligne ancrée sur 3 supports $S1$, $S2$ et $S3$. Un mouvement d'ensemble U est appliqué aux supports $S1$, $S2$ dans la direction X . Le support $S3$ lié à la traversée d'un bâtiment est supposée fixe.
Les modes statiques d'appui dans la direction X au niveau des supports $S1$ et $S2$ sont préalablement calculés.
La prise en compte du cas de charge s'écrit avec la syntaxe suivante :

```
DEPL_MULT_APPUI=(
            _F(NOM_CAS='depl_S1_X',
               NUME_CAS=1,
               MODE_STAT=modstat,
                NOEUD='NS1',
               DX=U,
               ),
            _F(NOM_CAS='depl_S2_X',
               NUME_CAS=2,
               MODE_STAT=modstat,
                NOEUD='NS2',
               DX=U,
               ), ),
   COMB_DEPL_APPUI=(
      _F(
         LIST_CAS=('1','2'),
         TYPE_COMBI = 'LINE'
         ),
```

•Réponse par direction et cumul secondaire total

Considérons une ligne ancrée sur 2 supports $S1$ et $S2$ et les déplacements différentiels sismiques suivants :

•support $S1$: $U1$, $V1$ et $W1$ dans les directions X , Y et Z
•support $S2$: $U2$, $V2$ et $W2$ dans les directions X , Y et Z

Les 6 modes statiques d'appui sont préalablement calculés.

La saisie des différents cas de charge est réalisée sous les occurrences de DEPL_MULT_APPUI :

```
DEPL_MULT_APPUI=(
            #support S1 au noeud NS1
            _F(
               NOM_CAS='depl_S1_X',
               NUME_CAS=1,
               MODE_STAT=modstat,
                NOEUD='NS1',
               DX=U1,
               ),
            _F(
               NOM_CAS='depl_S1_Y',
               NUME_CAS=2,
               MODE_STAT=modstat,
                NOEUD='NS1',
               DY=V1,
               ),
            _F(
               NOM_CAS='depl_S1_Z',
               NUME_CAS=3,
               MODE_STAT=modstat,
```

```
         NOEUD='NS1',
        DZ=W1,
        ),
    #support S2 au noeud NS2
    _F(
        NOM_CAS='depl_S2_X',
        NUME_CAS=4,
        MODE_STAT=modstat,
         NOEUD='NS2',
        DX=U2,
        ),
    _F(
        NOM_CAS='depl_S2_Y',
        NUME_CAS=5,
        MODE_STAT=modstat,
         NOEUD='NS2',
        DY=V2,
        ),
    _F(
        NOM_CAS='depl_S2_Z',
        NUME_CAS=6,
        MODE_STAT=modstat,
         NOEUD='NS2',
        DZ=W2,
        ),
    ),
```

Les réponses directionnelles sont établies sous les occurrences de COMB_DEPL_APPUI :

```
COMB_DEPL_APPUI=(
#cumul suivant X
             _F(
                 LIST_CAS=('1','4'),
                 TYPE_COMBI = 'QUAD',
                        ),
#cumul suivant Y
             _F(
                 LIST_CAS=('2','5'),
                 TYPE_COMBI = 'QUAD',
                        ),
#cumul suivant Z
             _F(
                 LIST_CAS=('3','6'),
                 TYPE_COMBI = 'QUAD',
                        ),
                 ),
```

La réponse totale secondaire est formée par le cumul quadratique des réponses directionnelles. Elle est calculée automatiquement.
Si l'impression des réponses directionnelles n'est pas nécessaire, la réponse totale peut se calculer directement sous une seule occurrence de COMB_DEPL_APPUI :

```
COMB_DEPL_APPUI=(
#réponse totale
             _F(
                 TOUT='OUI',
                 TYPE_COMBI = 'QUAD',
                 ),
```

3.9 Option de calcul : opérande `OPTION`

♦ `OPTION`

Liste des grandeurs (options de calcul) modales dont on veut déterminer la réponse combinée :

'DEPL'	déplacement relatif
'VITE'	vitesse relative
'ACCE_ABSOLU'	accélération absolue = accélération relative + accélération d'entrainement
'SIGM_ELNO'	contraintes par éléments aux nœuds
'SIEF_ELGA'	contraintes par éléments aux points d'intégration
'SIPO_ELNO'	contraintes dans la section de poutre décomposées en contributions de chaque effort généralisé
'EFGE_ELNO'	efforts généralisés par éléments aux nœuds
'REAC_NODA'	réactions aux appuis
'FORC_NODA'	efforts internes

3.10 Opérande `TITRE`

◊ `TITRE = t`

Titre attaché au concept produit par cette opérateur [U4.03.01].

3.11 Opérande `INFO`

◊ `INFO`

`/1` : impression sur le fichier “ message ” des informations suivantes :

- nom de la base modale utilisée,
- nombre de vecteurs propres retenus,
- règle de combinaison modale choisie,
- options de calcul demandées.

`/2` : idem 1

3.12 Mot clé `IMPRESSION`

◊ `IMPRESSION`

Impression sur le fichier “ résultat ” des informations suivantes :

`/ TOUT = 'OUI'`
`/ NIVEAU =`

'SPEC_OSCI'	Valeurs de l'excitation correspondant aux différents modes
'MASS_EFFE'	grandeurs modales dans la direction de l'excitation et cumul de la masse effective
'MAXI_GENE'	Contributions généralisées maximales

Avec `TOUT = 'OUI'`, on obtient les impressions correspondant à l'ensemble des 3 niveaux définis ci-dessus.

L'impression dans le fichier "résultat" des champs calculés est réalisée via les commandes IMPR_RESU [U4.91.01] ou POST_RELEVE_T [U4.81.21] en spécifiant les numéros d'ordre appropriés.

Pour une excitation mono-appui suivant les 3 directions X, Y et Z :
•réponses directionnelles [§3.7] :
numéros d'ordre 1, 2 et 3 pour les réponses suivant X, Y et Z
•combinaison des réponses directionnelles si COMB_DIRECTION est présent [§3.7.3] :
numéro d'ordre 4

Pour une excitation multi-appui suivant les 3 directions X, Y et Z :
•Si le mot clé COMB_DEPL_APPUI est absent, les composantes primaires et secondaires de la réponse sont cumulées :
•réponses directionnelles [§3.8.1] :
numéros d'ordre 1, 2 et 3 pour les réponses suivant X, Y et Z
•combinaison des réponses directionnelles si COMB_DIRECTION est présent [§3.7.3] :
numéro d'ordre 4
•Si le mot clé COMB_DEPL_APPUI est présent, les composantes primaires et secondaires de la réponse sont séparées :
- composante primaire :
  •réponses directionnelles [§3.8.3] :
  numéros d'ordre 1, 2 et 3 pour les réponses suivant X, Y et Z
  •combinaison des réponses directionnelles si COMB_DIRECTION est présent [§3.673] :
  numéro d'ordre 4
- composante secondaire [§3.8.2] :
  •champs résultant des combinaisons de cas de charge de déplacement indiquées sous n occurrences de COMB_DEPL_APPUI [§3.8.6]
  numéro d'ordre 200 pour l'occurrence 1
  numéro d'ordre $200+i-1$ pour l'occurrence i
  numéro d'ordre $200+n-1$ pour l'occurrence n
  •cumul quadratique total
  numéro d'ordre $200+n$

4 Concept en sortie

L'opérateur COMB_SISM_MODAL produit, pour des raisons pratiques de visualisation, un concept de type mode_meca. Toutefois il convient de faire attention au fait que le résultat n'est pas un mode propre mécanique. En particulier, il ne faut pas faire de post-traitement sur ce concept (cf. paragraphe 4.8 de la doc. [R4.05.03]).
Par ailleurs dans le paramètre 'FREQ', on stocke le numéro de direction sismique, conformément au paragraphe 3.12 :
1 ↔ direction X
2 ↔ direction Y
3 ↔ direction Z
4 ↔ cumul sur les directions (si demandé dans le calcul)

5 Bibliographie

•"A response spectrum method for random vibrations" Report UCB/EERC - 80/15 Berkeley (1980)

•"Response of linear systems to certain transient disturbances" Proceedings, Fourth World conference on earthquake engineering - Santiago of Chile (1969)

•Réponse sismique par méthode spectrale [R4.05.03]

•[NRC1.92] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.92 – Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis (July 2006)

•Expertise de l'analyse sismique de l'EPR Flammanville par COMB_SISM_MODAL et perspectives de développements, CR-AMA-11.210, E. Boyère, I. Zentner (15/07/2011)